

*На правах рукописи*

**ВЛАСОВА Дарья Дмитриевна**

**ВОЗБУЖДЕНИЕ СИГНАЛОВ ФОТОННОГО ЭХА  
И ОПТИЧЕСКОГО СВЕРХИЗЛУЧЕНИЯ В ПРИМЕСНЫХ  
КРИСТАЛЛАХ, НАНОКРИСТАЛЛАХ И  
МЕТАМАТЕРИАЛАХ**

01.04.05 — оптика

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата физико-математических наук

Казань — 2012

**Работа выполнена в лаборатории нелинейной оптики Федерального  
государственного бюджетного учреждения науки Казанского  
физико-технического института им. Е.К. Завойского Казанского  
научного центра Российской академии наук**

Научный руководитель:

кандидат физико-математических наук,  
Алексей Алексеевич Калачёв

Официальные оппоненты:

в.н.с. НИЦ «Курчатовский институт»,  
доктор физико-математических наук, профессор  
Сергей Владимирович Сазонов

профессор кафедры оптики и нанофотоники Казан-  
ского (Приволжского) федерального университета,  
доктор физико-математических наук, профессор  
Ренат Хамитович Гайнутдинов

Ведущая организация:

ФГБОУ ВПО «Самарский государственный  
университет»

Защита состоится «17» мая 2012 г. в 14<sup>40</sup> на заседании Диссертаци-  
онного Совета Д 212.081.07 в Казанском (Приволжском) федеральном  
университете по адресу: г. Казань. ул. Кремлевская, д.18.

С диссертацией можно ознакомиться в Научной библиотеке им. Н. И. Ло-  
бачевского Казанского (Приволжского) федерального университета.

Автореферат разослан «    » апреля 2012 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета,  
д.ф.-м.н., профессор

Д. И. Камалова

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность темы.** Хорошо известно, что когерентные переходные и кооперативные оптические явления типа фотонного эха (ФЭ) и оптического сверхизлучения (СИ) предоставляют широкие возможности для оптической обработки информации, преобразования и усиления оптических импульсов, а также создания источников когерентного излучения [1]. На основе ФЭ создан целый ряд устройств, осуществляющих операции корреляции, свертки и обработки оптических сигналов (см, например, [2]). В настоящее время явления ФЭ и СИ активно исследуются в целях создания оптической квантовой памяти [3, 4]. Полноценное использование устройств обработки информации на основе когерентных переходных и кооперативных оптических явлений в современных системах связи возможно, как правило, в многоканальном режиме. Поскольку в последних поколениях систем связи много внимания уделяется кодовому разделению каналов, актуальными являются исследования, направленные на его реализацию в режиме ФЭ. Что касается времени хранения информации, то оно определяется временами жизни долгоживущих состояний резонансной среды, в качестве которой, как правило, используются кристаллы, активированные некрамерсовыми редкоземельными ионами. Одним из возможных способов увеличения времени релаксации долгоживущих состояний в таких средах является изменение фононного спектра, которое можно получить при переходе от макроскопических образцов к нанокристаллическим материалам. Поэтому актуальной задачей является исследование формирования сигналов долгоживущего ФЭ (ДФЭ) в примесных нанокристаллах, обладающих, с одной стороны, характерной структурой долгоживущих уровней, а с другой стороны – дискретным фононным спектром, имеющим области с пониженной плотностью фононных мод. Наконец, сверхизлучение на кооперативных перехо-

дах оптических примесных центров в кристаллах позволяет совместить когерентное усиление слабых оптических сигналов, что является важным при реализации различных режимов оптической обработки информации в режиме ФЭ, с преобразованием частоты, благодаря чему частота накачки может быть меньше частоты усиливаемого сигнала. Существенным моментом в реализации СИ на кооперативном переходе является подавление СИ на частоте накачки, т.е. формирование долгоживущих возбуждённых состояний оптических центров. Перспективным способом управления радиационным временем жизни является внедрение оптических центров в активно исследуемые в настоящее время метаматериалы с показателем преломления, близким к нулю на частоте резонансного перехода. Кроме того, сверхизлучение лежит в основе функционирования лазеров класса D, возможность создания которых на основе полупроводниковых материалов сейчас активно изучается. Важно отметить, что необходимость минитюаризации устройств оптической обработки информации и объединения различных функциональных элементов (источников излучения, резонансных сред и детекторов) в интегральные оптические схемы естественным образом объединяет перечисленные выше актуальные направления исследований. Таким образом, задачи, решаемые в данной диссертационной работе, являются актуальными и затрагивают весьма современные и активно исследуемые области когерентной и квантовой оптики.

**Цель работы** — разработка новых режимов возбуждения сигналов долгоживущего фотонного эха и оптического сверхизлучения в примесных кристаллах, нанокристаллах и метаматериалах, перспективных для использования в системах оптической обработки информации.

В соответствии с данной целью были поставлены следующие **задачи диссертационной работы**:

1) теоретическая разработка методов кодового разделения каналов и ассоциативной выборки информации в устройствах оптической памяти на основе ДФЭ; разработка методов когерентного детектирования и маршрутизации сигналов на основе кодового разделения каналов;

2) исследование особенностей формирования сигналов ДФЭ в примесных нанокристаллах и анализ возможности увеличения времени жизни неравновесной населённости долгоживущих состояний за счет изменения фононного спектра;

3) исследование возможности наблюдения сигналов оптического сверхизлучения на кооперативных переходах атомных пар в протяжённых резонансных средах и возможности совмещения процессов когерентного усиления слабых оптических сигналов и преобразования частоты «вверх».

### **Основные положения диссертации, выносимые на защиту**

1) Система шумоподобных сигналов, сформированных на основе сегментов многофазовой последовательности Фрэнка, позволяет реализовать кодовое разделение каналов в устройствах оптической памяти на основе долгоживущего фотонного эха.

2) Время хранения информации в режиме долгоживущего фотонного эха в примесных нанокристаллах может быть больше, чем в макроскопических образцах из-за изменения фононного спектра при отсутствии резонанса между колебательными модами наноматрицы и электронными переходами примесного иона.

3) Внедрение оптических центров в метаматериал с показателем преломления, близким к нулю, позволяет совместить процессы оптического сверхизлучения на кооперативном переходе близкорасположенных оптических центров и преобразования частоты вверх излучения накачки.

### **Научная новизна**

1) Предложен способ построения системы шумоподобных сигналов,

основанный на использовании сегментов многофазовой последовательности Фрэнка, который позволяет по сравнению с системой случайных бифазовых сигналов существенно снизить взаимное влияние каналов и увеличить отношение сигнал/шум при считывании информации в режиме ФЭ.

2) Впервые исследованы особенности формирования сигналов ДФЭ в примесных нанокристаллах и определены оптимальные условия их возбуждения, выполнение которых необходимо для увеличения времени жизни неравновесной населённости долгоживущих состояний примесных ионов.

3) Впервые исследованы особенности СИ на кооперативных переходах близкорасположенных оптических центров, внедрённых в метаматериал с близким к нулю показателем преломления.

**Практическая значимость** полученных результатов заключается в том, что их можно использовать для создания устройств многоканальной обработки информации (корреляторы, маршрутизаторы и устройства задержки сигналов во времени), а также устройств, совмещающих когерентное усиление слабого сигнала с преобразованием частоты оптической накачки.

**Достоверность полученных результатов** обеспечивается использованием математически достоверных методов описания, согласием аналитических результатов с численными расчетами и согласием с более ранними результатами других авторов в предельных частных случаях.

**Апробация результатов.** Основные результаты диссертации были представлены на международных симпозиумах по фотонному эхо и когерентной спектроскопии (Калининград, PECS'2005; Казань, PECS'2009), международных молодежных научных школах «Когерентная оптика и оптическая спектроскопия» (Казань, 2005 г., 2006 г., 2007 г., 2010 г.),

всероссийской конференции «Концепции симметрии и фундаментальных полей в квантовой физике XXI века» (Самара, 2005 г.), международных Чтениях по квантовой оптике (Самара, IWQO'2007; Волгоград, IWQO'2011), всероссийских школах-семинарах «Волновые явления в неоднородных средах» (Звенигород, 2008 г., 2010 г.), всероссийском семинаре памяти Д.Н. Клышко (Москва, 2009 г.), международной конференции по когерентной и нелинейной оптике "The International Conference on Coherent and Nonlinear Optics / The Lasers, Applications, and Technologies" (Казань, ICONO/LAT'2010), а также докладывались на семинарах лаборатории нелинейной оптики КФТИ КазНЦ РАН.

Тематика диссертации связана с одной из базовых тем КФТИ КНЦ РАН: «Разработка методов когерентной оптической спектроскопии сверхбыстрого разрешения, исследование ультрабыстрых процессов в примесных твердотельных средах, полупроводниках, нанообъектах и поиск оптимальных режимов использования неклассического света в квантовых устройствах обработки информации» (2008-2012 г.г.). Индекс основного направления фундаментальных исследований: 2.3.

Основное содержание диссертации изложено в 10 научных работах: 8 статей опубликовано в центральной научной печати, из них 5 статей опубликованы в научных журналах, входящих в перечень научных изданий ВАК, рекомендованных для публикации основных результатов диссертации; 2 публикации – статьи в трудах молодежных научных конференций.

**Личный вклад автора.** Во всех совместных работах автором диссертации выполнены все численные эксперименты и их анализ. Значительная часть аналитических результатов получена автором самостоятельно, другие же получены совместно с научным руководителем при непосредственном участии диссертанта.

**Структура и объем работы.** Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения и списка цитируемой литературы. Общий объем диссертации составляет 115 страниц машинописного текста, включая 25 рисунков и список цитируемой литературы из 158 наименований. В конце диссертации сформулированы основные результаты и выводы.

## КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Введение** содержит обоснование актуальности темы исследования, формулировку цели и задач работы, основные положения, выносимые на защиту, отражает научную новизну и практическую значимость результатов, содержит описание структуры и содержания диссертации.

**Первая глава** является обзорной и содержит описание физических принципов формирования и свойств фотонного эха (ФЭ) и оптического сверхизлучения (СИ). Обсуждаются основные приближения, используемые при описании взаимодействия резонансной среды с когерентными импульсами электромагнитного поля и условия возбуждения оптических когерентных откликов. Описаны принципы функционирования устройств оптической памяти, основанных на явлении ФЭ и способы увеличения плотности записи информации в оптических запоминающих устройствах. Дан обзор исследований в области коллективного спонтанного излучения.

**Во второй главе** исследуется возможность кодового разделения каналов и ассоциативной выборки информации в режиме ДФЭ с использованием кодов Френка; анализируется влияние ошибок в реализации кодовых последовательностей и скорости переключения фазы многоимпульсных сигналов на качество воспроизведения информации. Предложена модель когерентного детектора и маршрутизатора на основе ДФЭ с возможностью перестройки на различные алфавиты кодов.



В *первом параграфе* анализируются процессы записи и считывания информации в режиме ДФЭ с использованием шумоподобных возбуждающих импульсов. Показано, что временная форма сигнала ДФЭ будет воспроизводить временную форму объектного импульса при условии, что функция корреляции первого и третьего импульсов является дельтаобразной. Это условие можно выполнить, если использовать возбуждающие импульсы, модулированные по фазе или амплитуде. Наиболее простыми являются импульсы со случайной бифазовой модуляцией, когда референтный и считывающий импульсы имеют прямоугольную временную форму и характеризуются амплитудой  $E$  и длительностью  $T$ , а в течение каждого подимпульса фаза поля переключается случайным образом между значениями  $0$  и  $\pi$  через промежутки времени  $T_b = T/N$ . Тогда, если псевдослучайные последовательности референтного и считывающего импульсов совпадают, то их корреляционная функция является дельтаобразной, следовательно, сигнал ДФЭ будет воспроизводить форму объектного импульса, а если же не совпадают, то дельта-образность функции корреляции пропадает, и сигнал ДФЭ полностью теряет информацию об объектном импульсе. Корреляционный пик шириной  $T_b$  имеет высоту в  $\sqrt{N}$  раз больше, чем среднеквадратичное отклонение случайного фона шириной  $2T$ . Еще большего отношения высоты корреляционного пика к случайному фону можно добиться, используя многофазовый сигнал Фрэнка [5, 6]. Он состоит из  $N = M^2$  элементарных импульсов длительностью  $T_b$ , начальные фазы которых задаются в виде

$$\varphi_{jn} = 2\pi \frac{p}{M} jn, \quad (1)$$

где  $p$  — число, взаимно простое с  $M$  (далее будем полагать, что  $p = 1$ ),  $j, n = 0, 1, \dots, M - 1$ , а номер элементарного импульса  $m = 1, \dots, N$  связан с индексами  $j$  и  $n$  соотношением  $m = jM + n + 1$ . Другими

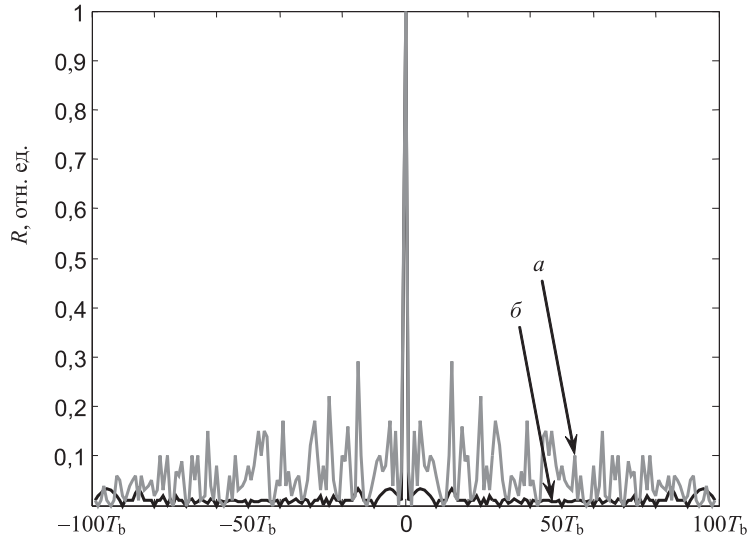


Рис. 1. Функции автокорреляции  $R(y) = \int E^*(x)E(x+y)dx$  сигнала со случайной бифазовой модуляцией (а) и сигнала Фрэнка (б), состоящих из  $N = 100$  элементарных импульсов.

словами, если представить начальные фазы  $\varphi_{ij}$  в виде матрицы, то последовательность элементарных импульсов в сигнале Фрэнка будет соответствовать построчному перечислению элементов этой матрицы. Пик автокорреляционной функции сигнала Фрэнка в  $2N^{3/4}$  раз больше, чем среднеквадратичное отклонение случайного фона. По сравнению с сигналом со случайной бифазовой модуляцией сигнал Фрэнка имеет существенно меньшие значения боковых выбросов и, следовательно, приводит к значительно лучшему соотношению сигнал/шум при считывании информации в режиме ДФЭ (рис. 1).

Во *втором параграфе* в качестве простейшей системы шумоподобных сигналов, позволяющей осуществлять многоканальную обработку информации в режиме ДФЭ с кодовым разделением каналов, предлагается использовать сегменты многофазовой последовательности Фрэнка. Если  $M$  является кратным некоторого целого числа  $q$ , то последовательность Фрэнка, содержащую  $N = M^2$  элементарных импульсов длитель-

ностью  $T_b$ , можно разбить на  $q$  сегментов, каждый из которых содержит  $N/q$  элементарных импульсов, описывается  $M/q$  строками матрицы  $\varphi_{ij}$  и может рассматриваться как базовый фазоманипулированный сигнал для отдельного канала.

$$\varphi_{ij} = \left( \begin{array}{cccc} \varphi_{00} & \varphi_{01} & \dots & \varphi_{0(M-1)} \\ \varphi_{10} & \varphi_{11} & \dots & \varphi_{1(M-1)} \\ \varphi_{20} & \varphi_{21} & \dots & \varphi_{2(M-1)} \\ \varphi_{30} & \varphi_{31} & \dots & \varphi_{3(M-1)} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ \varphi_{(M-2)0} & \varphi_{(M-2)1} & \dots & \varphi_{(M-2)(M-1)} \\ \varphi_{(M-1)0} & \varphi_{(M-1)1} & \dots & \varphi_{(M-1)(M-1)} \end{array} \right) \left. \begin{array}{l} \left. \begin{array}{l} \left. \begin{array}{l} \rightarrow \text{1-й канал} \\ \rightarrow \text{2-й канал} \end{array} \right\} \\ \rightarrow \text{q-й канал} \end{array} \right\} \end{array} \right. \quad (2)$$

Средняя интенсивность случайного фона при использовании сегментов последовательности Фрэнка получается меньше, чем при использовании случайной бифазовой последовательности той же длительности, а в силу ортогональности различных сегментов взаимное влияние каналов получается намного меньше, чем в случае использования бифазовых случайных последовательностей (взаимные корреляционные функции обращаются в нуль при величине сдвига, кратной  $MT_b$ ). С помощью данной системы фазоманипулированных сигналов можно осуществить  $q$ -канальную запись и воспроизведение информации в режиме ДФЭ: при записи информации на резонансную среду воздействует  $q$  пар возбуждающих импульсов. В каждой паре референтный импульс является одним из  $q$  базовых фазоманипулированных сигналов, а объектный импульс имеет свою временную форму, содержащую некоторую информацию. Для считывания информации в  $n$ -ом канале необходимо подать считывающий импульс, совпадающий с  $n$ -ым референтным импульсом.

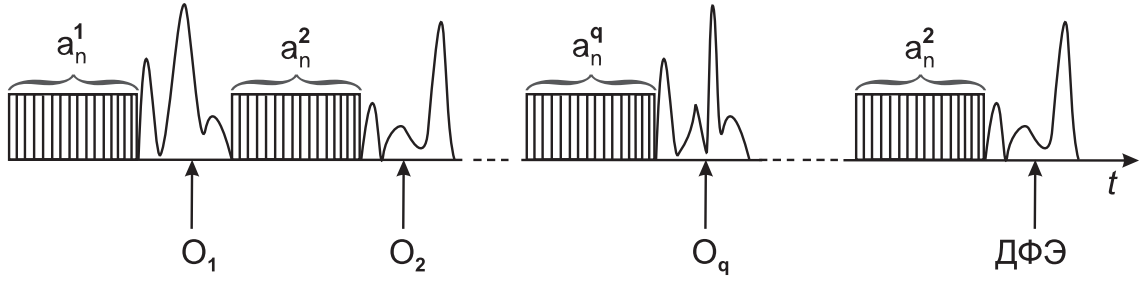


Рис. 2. Многоканальная запись и считывание информации в режиме ДФЭ:  $a_n^i$  —  $i$ -й референтный кодирующий импульс (базовый фазоманипулированный сигнал, содержащий  $n$  элементарных импульсов,  $i = 1, 2, \dots, q$ ,  $q$  - число каналов),  $O_i$  — объектные импульсы, содержащие информацию.

При этом интенсивность сигнала ДФЭ определяется следующим выражением:

$$I_{ДФЭ}(n) \sim \sum_{m=1}^q \left( \iint E_{1m}^*(x) E_{3n}(y+x) E_{2m}(t-y) dx dy \right)^2, \quad n=1, \dots, q. \quad (3)$$

Таким образом, при считывании информации, записанной в определенном канале, возникает шум, обусловленный влиянием других каналов и связанный с тем, что взаимная корреляционная функция различных базовых сигналов не равна нулю. На рис. 3 приведены результаты численного расчета временной формы сигнала ДФЭ по формуле (3). В качестве системы шумоподобных сигналов используются случайно бифазовомодулированные сигналы (рис. 3б) и сегменты последовательности Фрэнка (рис. 3в). В обоих случаях число каналов равно 16. На рис. 3а изображен объектный импульс, состоящий из 32 битов, в канале, где производится считывание информации. Исходная последовательность Фрэнка задавалась параметром  $M = 128$ , поэтому шумоподобные референтные и считывающие импульсы в каждом канале содержали 1024 элементарных импульса. Видно, что использование системы многофазовых сигналов вместо системы бифазовых случайных сигналов приводит к значительно меньшему уровню шума при считывании информации (уровень шума — около 1% от интенсивности сигнала) и последовательность битов вос-

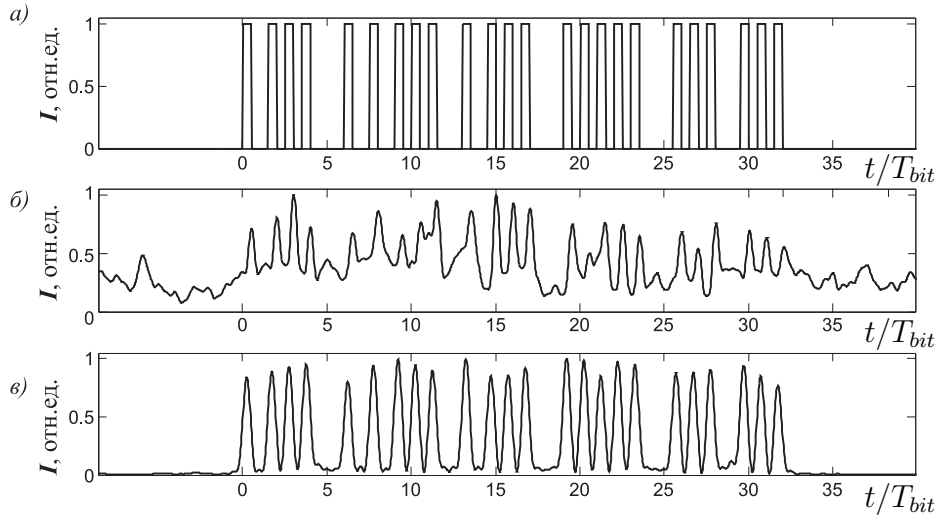


Рис. 3. Временная форма объектного импульса в канале, в котором производится считывание (а), и временная форма отклика ДФЭ в том случае, когда в качестве системы шумоподобных сигналов используются случайно бифазово модулированные сигналы (б) и сегменты последовательности Фрэнка (в);  $T_{bit}$  - длительность бита в объектном импульсе.

становливаются верно (рис. 3в). Если считывающий импульс содержит ошибки, то качество воспроизведения ухудшается. Однако распознать исходный сигнал в отклике при округлении интенсивности по уровню  $1/2$  от максимального значения можно даже тогда, когда считывающий импульс содержит 30% подымпульсов с неправильной фазой или 20% потерянных подымпульсов.

В *третьем параграфе* описывается возможная схема маршрутизатора оптических сигналов, функционирующего в режиме ДФЭ, и делается оценка максимального числа каналов исходя из типичных значений времен релаксаций, используемых резонансных сред и геометрии эксперимента. На стадии программирования резонансная среда подвергается воздействию  $q$ -пар возбуждающих импульсов. В каждой паре референтный (первый) импульс является одним из  $q$  базовых фазоманипулированных сигналов, а объектный (второй) импульс имеет свой волновой вектор  $\mathbf{k}_i$  ( $i = 1, \dots, q$ ). Таким образом, устройство программируется на работу

с определенным алфавитом кодов, т.е. в него записывается информация о каждом возможном принимаемом сигнале и о том направлении, которое присваивается каждому сигналу. Если подать считывающий импульс, совпадающий с  $i$ -ым референтным импульсом, то в направлении соответствующего волнового вектора высветится сигнал ДФЭ, а в остальных направлениях будет присутствовать только шум, связанный с тем, что взаимная корреляционная функция различных базовых сигналов не равна нулю. Показано, что при возбуждении резонансной среды, близком к коллинеарному, число каналов может достигать  $10^3$ .

**Третья глава** посвящена исследованию особенностей формирования ДФЭ в примесных нанокристаллах.

В *первом параграфе* рассмотрен процесс формирования сигналов ДФЭ при воздействии последовательности возбуждающих лазерных импульсов на редкоземельные ионы в ван-флековском парамагнетике. Получено выражение для интенсивности отклика ДФЭ как функции временных интервалов между возбуждающими импульсами с учетом процессов релаксации при произвольном числе сверхтонких подуровней основного и возбужденного электронных состояний.

Во *втором параграфе* анализируются механизмы релаксации неравновесной населенности сверхтонких подуровней основного электронного состояния примесных ионов, определяющие время хранения информации в режиме ДФЭ. На примере кристалла  $LaF_3 : Pr^{3+}$  рассмотрены вклады двухфононных процессов Рамана и Орбаха-Аминова при различных температурах образца.

В *третьем параграфе* анализируются особенности формирования сигналов ДФЭ при переходе от массивных к наноразмерным кристаллам. Основное внимание уделяется изменениям фононного спектра (акустические фононные моды становятся дискретными, а фотонный спектр огра-

ничен снизу некоторой минимальной частотой  $\omega_{min}$ ) и их влиянию на скорости двухфоонных процессов релаксации. Если нанокристалл достаточно мал и частотные интервалы между колебательными модами сравнимы с величиной  $\Delta$ , то в случае процесса Орбаха-Аминова можно ограничиться рассмотрением взаимодействия примесных частиц лишь с одной основной колебательной модой частотой  $\omega_{min}$  и шириной  $\gamma \ll \omega_{min}$ , так что плотность фоонных состояний принимает вид:

$$g(\omega) = \frac{1}{\pi} \frac{\gamma/2}{(\omega - \omega_{min})^2 + (\gamma/2)^2}. \quad (4)$$

Тогда отношение скоростей процесса Орбаха-Аминова в нанокристалле и объемном макроскопическом образце получается равным

$$\frac{\left. \frac{1}{T_1} \right|_{рез}^{нано}}{\left. \frac{1}{T_1} \right|_{рез}^{макро}} = \frac{1}{24\pi^2} \left( \frac{\gamma}{\Delta} \right) \left( \frac{\lambda^3}{V_{нано}} \right) \left( \frac{\omega_{min}}{\Delta} \right)^3, \quad (5)$$

где  $\lambda = 2\pi v/\omega_{min}$ . Следовательно, поскольку  $\gamma \ll \Delta$  (время жизни основной моды может достигать нескольких миллисекунд),  $\lambda^3 \sim V_{нано}$  и  $\omega_{min} \lesssim \Delta$ , в отсутствии резонанса между колебательной модой и частотой электронного перехода скорость релаксации за счет процесса Орбаха-Аминова может уменьшиться даже при существенном увеличении константы электрон-фоонного взаимодействия [7].

Рассмотрены возможные схемы изоляции нанокристаллов, позволяющие наблюдать рассмотренные выше эффекты и таким образом увеличить время хранения информации в режиме ДФЭ. Одним из вариантов является прикрепление наночастиц к поверхности охлаждаемой подложки. В этом случае взаимодействие нанокристаллов с колебаниями подложки может быть существенно слабее, чем их взаимодействие с окружением в случае внедрения в аморфную матрицу [8]. Другим возможным

вариантом является оптическая левитация диэлектрических наночастиц. Оценки показывают [9], что диэлектрическая наносфера диаметром 50 нм может быть практически полностью изолирована от окружения с точки зрения колебательного движения центра масс.

**Четвертая глава** посвящена теоретическому анализу возможности наблюдения сигналов оптического сверхизлучения на кооперативных переходах в протяженных резонансных средах.

*В первом параграфе* рассмотрены кооперативные излучательные явления, наблюдаемые в системах-кластерах, состоящих из небольшого числа близкорасположенных частиц, при наличии электростатического и/или обменного взаимодействия между частицами, а именно: кооперативное поглощение одного фотона двумя или более взаимодействующими частицами и противоположный процесс, называемый кооперативной люминесценцией.

*Во втором параграфе* приведен вывод и проанализированы условия применимости основного кинетического уравнения для оператора плотности атомной системы, взаимодействующей с вакуумным резервуаром, в приближении Борна—Маркова.

*В третьем параграфе* обсуждаются особенности метаматериалов с близким к нулю показателем преломления, обобщение основного кинетического уравнения на случай неоднородного магнетодиэлектрика и тензор Грина многослойного сферического магнетодиэлектрика, позволяющий описывать коллективные и кооперативные оптические явления в образцах со сферической симметрией.

*В четвертом параграфе* анализируется возможность реализации сверхизлучения на кооперативном переходе в метаматериале с близким к нулю показателем преломления. Предлагается следующая модель: два одинаковых двухуровневых атома, имеющих радиус-векторы  $\mathbf{r}_j$  ( $j = 1, 2$ ) и



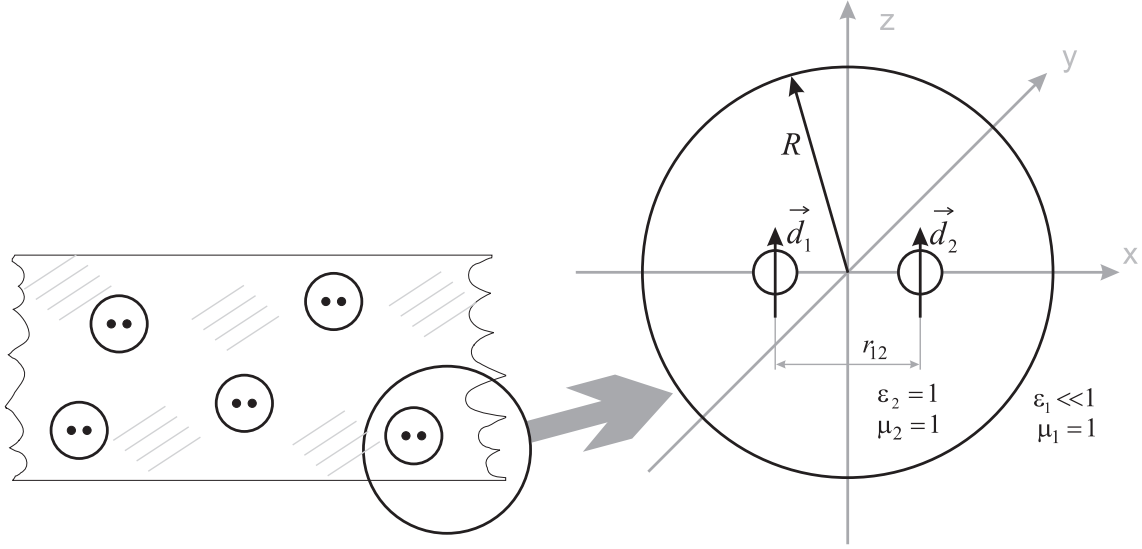


Рис. 4. Сферическая частица радиуса  $R$ , содержащая два атома с дипольными моментами  $\mathbf{d}_1$  и  $\mathbf{d}_2$ , помещенная в метаматериал с диэлектрической проницаемостью  $\epsilon_1$ ,  $|\epsilon_1| \ll 1$ .

резонансные частоты  $\omega_0$ , находятся вблизи центра сферической диэлектрической частицы, которая, в свою очередь, внедряется в метаматериал с близким к нулю показателем преломления на частоте  $\omega_0$  и обычным значением показателя преломления, скажем 1, на частоте кооперативного перехода  $2\omega_0$  (рис. 4). Атомы взаимодействуют между собой и с окружением только через электромагнитное поле. Оптическое сверхизлучение наблюдается в системе таких двухатомных кластеров, взаимодействующих друг с другом на частоте кооперативного перехода. Сферические полости являются простейшей моделью оптических центров замещения.

Выполнен расчет скорости спонтанного распада возбужденных атомных состояний  $\Gamma_{ii}$ , сверхизлучательного вклада в скорость распада  $\Gamma_{12}$  и частотного сдвига, вызванного диполь-дипольным взаимодействием,  $\Omega_{12}$ . Эти величины определяются тензором Грина электрического поля  $\mathbf{G}(\mathbf{r}_1, \mathbf{r}_2, \omega_0)$ , описывающего распространение резонансного поля из точки  $\mathbf{r}_2$  в точку  $\mathbf{r}_1$ , и могут быть записаны в виде

$$\Gamma_{ij} = \frac{2\omega_0^2}{\hbar\epsilon_0 c^2} \mathbf{d}_i \text{Im} \mathbf{G}(\mathbf{r}_i, \mathbf{r}_j, \omega_0) \mathbf{d}_j, \quad (6)$$

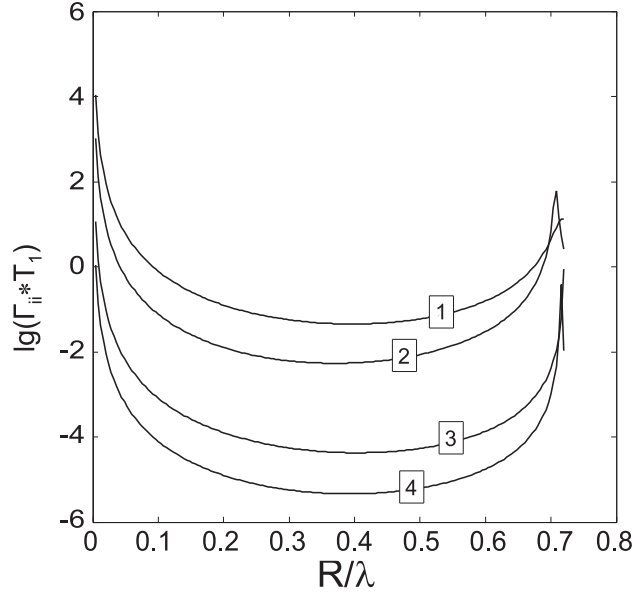


Рис. 5. Зависимость скорости релаксации возбужденного состояния атомов  $\Gamma_{ii}$  от радиуса сферической диэлектрической частицы  $R$  при различных значениях комплексного показателя преломления метаматериала  $n_1 = \sqrt{\epsilon_1}$ :  $0.1 + 0.1i$  (кривая 1),  $0.1 + 0.01i$  (кривая 2),  $0.0001 + 0.1i$  (кривая 3),  $0.0001 + 0.01i$  (кривая 4).  $\lambda = 2\pi\omega_0/c$  — длина волны излучения в вакууме,  $T_1$  — радиационное время жизни.

$$\Omega_{12} = \frac{\omega_0^2}{\hbar\epsilon_0 c^2} \mathbf{d}_1 \text{Re} \mathbf{G}(\mathbf{r}_1, \mathbf{r}_2, \omega_0) \mathbf{d}_2. \quad (7)$$

На рис. 5 приведены характерные зависимости скорости релаксации возбужденного состояния атомов  $\Gamma_{ii}$  от радиуса сферической диэлектрической частицы  $R$  при различных значениях комплексного показателя преломления метаматериала  $n_1 = \sqrt{\epsilon_1}$  на частоте резонансного перехода  $\omega_0$ . Расстояние между атомами  $r_{12}$  полагалось равным  $\lambda/1000$ , где  $\lambda = 2\pi\omega_0/c$  — длина волны излучения в вакууме. Что касается величины диполь-дипольного взаимодействия, энергия которого равна  $\hbar\Omega_{12}$ , то она практически не зависит от радиуса сферы и показателя преломления метаматериала, оставаясь равной своему значению в вакууме. Таким образом, наличие метаматериала с близким к нулю показателем преломления позволяет существенно снизить скорость спонтанного излучения, оставляя нетронутым канал релаксации возбужденных атомных состоя-

ний через кооперативный переход. Рассмотренная схема позволяет осуществлять накачку оптических центров на частоте резонансного перехода атомов и при достаточно высокой концентрации двухатомных кластеров наблюдать сверхизлучение на частоте кооперативного перехода.

В *пятом параграфе* рассматриваются особенности сверхизлучательного рассеяния вперёд на кооперативном переходе в протяженном ансамбле пар оптических центров. Именно такой режим сверхизлучения является наиболее удобным для постановки первых экспериментов. На основе имеющихся экспериментальных данных сделаны оценки, показывающие возможность экспериментальной реализации сверхизлучательного рассеяния вперёд в системе пар примесных ионов  $Yb^{3+}$ .

## ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

1) Теоретически разработаны методы кодового разделения каналов и ассоциативной выборки информации в устройствах оптической памяти на основе ФЭ с использованием в качестве ключа шумоподобных сигналов. Предложен простой способ построения системы шумоподобных сигналов, основанный на использовании сегментов многофазовой последовательности Фрэнка. Показано, что по сравнению с системой случайных бифазовых сигналов данная система позволяет существенно снизить взаимное влияние каналов и увеличить отношение сигнал/шум при считывании информации. Показано, что время переключения фазы при формировании фазоманипулированных последовательностей может быть сравнимо с длительностью элементарных сигналов без существенного снижения качества автокорреляционной функции.

2) Определены оптимальные условия возбуждения сигналов ДФЭ в примесных нанокристаллах. Исследована зависимость скорости релаксации неравновесной населённости долгоживущих сверхтонких подуровней

основного электронного состояния примесных ионов от параметров наночастицы, играющей роль акустического резонатора. Показано, что если частоты переходов между электронными состояниями примесных ионов попадают в свободную спектральную зону наночастицы, то скорость релаксации неравновесной населённости долгоживущих подуровней может существенно уменьшиться по сравнению с величиной, характерной для объёмного макроскопического кристалла.

3) Проанализирована возможность наблюдения коллективного спонтанного излучения на кооперативном переходе, возникающем в ансамбле пар взаимодействующих оптических центров, помещённых в метаматериал. Показано, что при стремлении эффективного показателя преломления метаматериала к нулю (на частоте оптического перехода оптических центров) скорость релаксации возбуждённых атомных состояний существенно уменьшается, что позволяет совместить когерентное усиление слабых импульсов света на частоте кооперативного перехода с преобразованием частоты «вверх» оптической накачки на частоте резонансного перехода оптических центров.

## ВЫВОДЫ

1) Долгоживущее фотонное эхо в примесных кристаллах позволяет эффективно реализовать кодовое разделение каналов в устройствах оптической обработки информации.

2) Изолированные примесные нанокристаллы и метаматериалы с близким к нулю показателем преломления являются перспективными материалами для возбуждения сигналов долгоживущего фотонного эха и кооперативного сверхизлучения.

## СПИСОК АВТОРСКОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

- [A1] **Власова, Д. Д.** Ассоциативная оптическая память на основе стимулированного фотонного эха с временным кодированием данных / Д. Д. Власова, А. А. Калачев, В. В. Самарцев // Тр. XIII международной молодежной научной школы "Когерентная оптика и оптическая спектроскопия" под ред. М. Х. Салахова и В. В. Самарцева. — Казань: КГУ, 2004. — С. 383-389.
- [A2] **Власова, Д. Д.** Ассоциативная выборка информации в режиме фотонного эха с использованием кодов Фрэнка / Д. Д. Власова, А. А. Калачев // Тр. IX международной молодежной научной школы "Когерентная оптика и оптическая спектроскопия" под ред. М. Х. Салахова и В. В. Самарцева. — Казань: КГУ, 2005. — С. 65-68.
- [A3] **Власова, Д. Д.** Когерентное детектирование фазоманипулированных сигналов в режиме долгоживущего фотонного эха / Д. Д. Власова, А. А. Калачев // Теоретическая физика. — 2005. — Т. 6. — С. 144-150.
- [A4] **Власова, Д. Д.** Кодовое разделение каналов в оптической памяти на основе фотонного эха / Д. Д. Власова, А. А. Калачев, В. В. Самарцев // Известия РАН, серия физическая. — 2006. — Т. 70, № 4. — С. 518-521.
- [A5] **Власова, Д. Д.** Ассоциативная выборка информации в оптической памяти на основе фотонного эха с использованием кодов Фрэнка / Д. Д. Власова, А. А. Калачев, В. В. Самарцев // Ученые записки КГУ, серия физико-математические науки. — 2006. — Т. 148, кн. 1. — С. 77-82.
- [A6] **Vlasova, D. D.** Code division in optical memory devices based on photon echo / A. A. Kalachev, D. D. Vlasova // Proceedings of SPIE. — 2006. — V. 6181. — P. 61810G.

- [A7] **Власова, Д. Д.** Оптимальные условия возбуждения сигналов долгоживущего фотонного эха в примесных нанокристаллах / Д. Д. Власова, А. А. Калачев // Известия РАН, серия физическая. — 2008. — Т. 72, № 12. — С. 1750-1753.
- [A8] **Власова, Д. Д.** Долгоживущее фотонное эхо в примесных нанокристаллах / Д. Д. Власова, А. А. Калачев // Ученые записки КГУ, серия физико-математические науки. — 2008. — Т. 150, кн. 2. — С. 86-91.
- [A9] **Vlasova, D. D.** Long-lived photon echo in doped nanocrystals / A. A. Kalachev, D. D. Vlasova // Proceedings of SPIE. — 2008. — V. 7024. — P. 70240I.
- [A10] **Власова, Д. Д.** Оптическое излучение на кооперативных переходах в метаматериалах / Д. Д. Власова, А. А. Калачев // Известия РАН, серия физическая. — 2012. — Т. 76, № 3. — С. 297-300.

## СПИСОК ЦИТИРОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] **Калачев, А. А.** Когерентные явления в оптике / А. А. Калачев, В. В. Самарцев. — Казань:КГУ, 2003. — 280 с.
- [2] **Cole, Z.** Unambiguous range-Doppler LADAR processing using 2 giga-sample-per-second noise waveforms / Z. Cole, P. A. Roos, T. Berg, B. Kaylor et. al. // J. Lumin. — 2007. — V. 127. — P. 146.
- [3] **Moiseev, S. A.** Complete Reconstruction of the Quantum State of a Single-Photon Wave Packet Absorbed by a Doppler-Broadened Transition / S. A. Moiseev, S. Kröll // Phys. Rev. Lett. — 2001. — V. 87. — P. 173601.
- [4] **Kalachev, A.** Coherent control of collective spontaneous emission in an extended atomic ensemble and quantum storage / A. Kalachev, S. Kröll // Phys. Rev. A. — 2006. — V. 74. — P. 023814.

- [5] **Лезин, Ю. С.** Оптимальные фильтры и накопители импульсных сигналов. — М., 1963. — 320 с.
- [6] **Кук, Ч.** Радиолокационные сигналы. Теория и применение / Ч. Кук, М. Бернфельд. — М., 1971. — 568 с.
- [7] **Simon, D. T.** Electron-phonon dynamics in an ensemble of nearly isolated nanoparticles / D. T. Simon, M. R. Geller // Phys. Rev. B. — 2001. — V. 64. — P. 115412.
- [8] **Malyukin, Yu. V.** New fluorescence dynamics of a single  $Y_2SiO_5 : Pr^{3+}$  nanocrystal / Yu. V. Malyukin, A. A. Masalov, P. N. Zhmurin // Optics Communications. — 2004. — V. 239. — P. 409.
- [9] **Chang, D. E.** Cavity opto-mechanics using an optically levitated nanosphere / D. E. Chang, C. A. Regal, S. B. Papp, D. J. Wilson // PNAS. — 2010. — V. 107. — P. 1005.